

**ČESKÉ VYSOKÉ
UČENÍ TECHNICKÉ
V PRAZE**

**FAKULTA
STROJNÍ**



**BAKALÁŘSKÁ
PRÁCE**

2018

**JURAJ
ŠTEFÁNIK**

Čestné prohlášení

Prohlašuji, že jsem bakalářskou práci na téma *Návrh sušky pro odpadní biomasu s vysokou vlhkostí* vypracoval samostatně, pod vedením vedoucího bakalářské práce pana Ing. Jana Havlíka, Ph.D. a za pomoci literatury a zdrojů uvedených v seznamu použitých zdrojů.

V Praze dne 2018

.....

Juraj Štefánik

Anotční list

Jméno autora	Juraj Štefánik
Název BP/DP	Návrh sušky pro odpadní biomasu s vysokou vlhkostí
Anglický název:	Design of a dryer for waste biomass with high water content
Akademický rok:	2017/2018
Ústav/Odbor:	Ústav energetiky/Energetika a procesní technika
Vedoucí BP/DP:	Ing. Jan Havlík, Ph.D.
Konzultant:	
Bibliografické údaje:	Počet stran: 47 Počet obrázků: 23 Počet tabulek: 12 Počet příloh: 0
Klíčová slova:	Biomasa, sušení biomasy, měrná odpařivost, návrh sušárny
Keyword:	Biomass, drying of biomass, specific evaporation, design of the dryer
Anotace:	Práce se zabývá návrhem sušárny pro biomasu s vysokým obsahem vlhkosti, procesem sušení a různými druhy sušek. Návrh sušky vychází z experimentálně zjištěných dat pomocí kampaňovité sušárny v laboratoři. Návrh obsahuje rozměrový, technologický návrh a schéma navržené sušárny.
Abstract:	This work deals with the design of a biomass dryer with a high moisture content, a drying process and various types of dryers. Sugar design is based on experimentally detected data using a campaign dryer in a laboratory. The proposal includes a dimensional, technological design and schema of a designed dryer.

Poděkování

Tímto bych chtěl poděkovat Ing. Janu Havlíkovi, Ph.D. za cenné rady, připomínky a za organizaci experimentu v dílnách ČVUT, které mi pomohli při vytváření této bakalářské práce.

Obsah

1. Seznam použitých symbolů	8
2. Úvod	10
3. Biomasa	11
4. Vlhkost	12
4.1 Způsob vazby vody v materiálu	13
4.2 Formy vazby vlhkosti	13
4.3 Adsorpce a desorpce	14
4.4 určení obsahu vody v materiálu	14
5. Sušení biomasy	15
5.1 Metody sušení	16
5.2 Parametre sušení	17
5.3 Statika sušení	17
5.4 Kinetika sušení	18
6. Sušárny	19
6.1 Bubnová rotační sušárna	19
6.2 Fluidní sušárna	20
6.3 Pásová sušárna	21
6.4 Rourová sušárna	21
6.5 Lopatková sušárna	22
6.6 Šneková sesypná sušárna	22
6.7 Rozprašovací sušárna	23
6.8 Mikrovlnná sušárna	24
6.9 Sušárna s dielektrickým ohřevem	24
6.10 Sušárna s infračerveným zářením	25
6.11 Sublimační sušárna	25
6.12 Porovnání sušáren a vhodný výběr	26

7. Experimentální část	27
7.1 Experiment č.1 Sušení s mícháním	27
7.1.1 Zjištěné hodnoty z experimentu	29
7.1.2 Křivka sušení	31
7.1.3 Měrná odpařivost	31
7.1.4 Energetická náročnost	33
7.1.5 Vyhodnocení experimentu	35
7.2 Experiment č.2 Sušení bez míchání	36
7.2.1 Zjištěné hodnoty z experimentu	36
7.2.2 Porovnání experimentů	37
7.2.3 Vyhodnocení experimentu	38
8. Návrhová část	39
8.1 Hmotnostní bilance	39
8.2 Tepelná bilance	40
8.3 Návrh rozměrů bubnu	41
8.4 Energetická náročnost	41
8.5 Technologický návrh	42
8.6 Schéma sušárny	43
9. Závěr	44
10. Seznam použité literatury	45

1. Seznam použitých symbolů

c_s	Měrná tepelná kapacita sušiny	[kJ/kg.K]
c_v	Měrná tepelná kapacita vody	[kJ/kg.K]
d	Vnitřní průměr	[m]
$h_{A0,1}$	Entalpie vzduchu vstup/výstup	[kJ/kg]
$h_{s0,1}$	Entalpie sušeného materiálu vstup/výstup	[kJ/kg]
H_l	Entalpie kondenzátu	[kJ/kg]
H_v	Entalpie páry	[kJ/kg]
l	Délka	[m]
\dot{m}	Množství potřebné páry	[kg/h]
m_{h2o}	Množství vodní páry	[kg]
m_s	Množství vzduchu	[kg]
\dot{M}_A	Hmotnostní tok suchého vzduchu	[kg/h]
\dot{M}_S	Hmotnostní tok suchého materiálu	[kg/h]
M_{sp}	Množství sušeného paliva	[kg/h]
$M_{sp,exp}$	Množství štěrky - experiment	[kg]
$M_{suš}$	Množství sušiny	[kg/h]
$M_{suš,exp}$	Množství sušiny - experiment	[kg]
M_{vp}	Množství vysušeného paliva	[kg/h]
M_w	Množství odebrané vody	[kg/h]
$M_{w,exp}$	Množství odpařené vody - experiment	[kg]
$M_{w,sp}$	Množství vody v sušeném palivu	[kg/h]
$M_{w,vp}$	Množství vody ve vysušeném palivu	[kg/h]
O_o	Měrná odpařivost objemová	[kg/h.m ³]
O_p	Měrná odpařivost plošná	[kg/h.m ²]
P_{skut}	Tepelný příkon k sušení teoretický	[kW]
P_{teor}	Tepelný příkon k sušení teoretický	[kW]
\dot{Q}	Hmotový průtok	[kg/h]
Q_c	Teplo celkové	[kJ]
Q_{oD}	Teplo k odpaření vody	[kJ]
Q_{oN}	Teplo k ohřevu vody	[kJ]

Q_{opr}	Opravný součinitel ztráty tepla	[kJ]
Q_{oS}	Teplo k ohřevu sušiny	[kJ]
Q_{Skut}	Teplo dodané pro 1 kg vody skutečné	[kJ]
Q_{teor}	Teplo dodané pro 1 kg vody teoretické	[kJ]
Q_z	Ztráta tepla	[kJ]
r	Vnitřní poloměr	[m]
r_{FG}	Měrné výparné teplo vody	[kJ/kg]
S_{pl}	Teplo-směnná plocha	[m ²]
T	teplota sušiny	[K]
$T_{A0,1,2}$	Dodané teplo	[°C]
t_{sp}	Teplota sušeného paliva počáteční	[°C]
t_{vp}	Teplota vysušeného paliva výstupní	[°C]
t_w	Teplota varu vody	[°C]
V	Objem válce	[m ³]
\dot{W}	Úhrnné teplo dodané	[kJ/h]
W	Množství odpařené vody - návrh	[kg/h]
W_{sp}	Vlhkost sušeného paliva	[%]
W_{vp}	Vlhkost vysušeného paliva	[%]
$X_{A0,1}$	Měrná vlhkost vzduchu vstup/výstup	[kg/kg]
X_K	Kritická vlhkost	[kg/kg]
\dot{X}_R	Rychlost sušení	[kg/h]
X_R	Zbytková vlhkost	[kg/kg]
X_S	Měrná vlhkost materiálu	[kg/kg]
X_S^*	Bezrozměrná vlhkost	[-]
$X_{S0,1}$	Měrná vlhkost sušeného materiálu vstup/výstup	[kg/kg]
η	Účinnost sušení	[%]
τ_n	Čas	[s]
Δt	Rozdíl teplot	[-]
ω	Relativní vlhkost	[%]

2. Úvod

Poptávka po výrobě tepla a elektřiny roste každým rokem. Největší podíl na výrobě této energie v ČR mají fosilní paliva, které produkují mnoho emisí. Patří mezi ně hnědé a černé uhlí, ropa a zemní plyn. Fosilní paliva jsou vyčerpatelné zdroje, proto je potřeba dbát na tento zřetel. Jeho alternativou jsou obnovitelné zdroje energie, ke kterým patří také biomasa.

Biomasu je možné vyprodukovat v rámci pár let, nebo i desítek let podle druhu. Řadí se mezi bezemisní technologie. Má nulovou produkci CO_2 [1], proto může být použita ve zdrojích spalování k dodržení emisních limitů a stropů, také k energetické stabilitě a nezávislosti.

Čerstvě sklizenou biomasu je potřeba před procesem spalování upravit. Příliš vysoká vlhkost paliva snižuje výhřevnost, podílí se na ztrátě tepla a také zhoršuje podmínky spalování. Proto je vhodné tuto biomasu vysušit nejvhodnějším procesem sušení. Při použití aktivního sušení je nutno vybrat vhodný typ sušárny pro vybraný druh sušeného materiálu a parametre sušení.

Cílem této práce je **Návrh sušky pro odpadní biomasu s vysokou vlhkostí** pro zadané parametry. Důležitou součástí návrhu je experimentální určení provozních charakteristik zjištěných ve dvou experimentech. Návrh sušky zahrnuje základní rozměry sušky, její energetickou náročnost a technologickou část. Návrh je zakončen schématem navržené sušky.

3. Biomasa

Je definována jako části těl a zbytky organismů rostlinného, ale i živočišného původu.

Biomasa může pocházet z odpadů, nebo je také záměrně pěstována k energetickému využití

Patří sem sláma, zbytky z údržby zeleně, živočišné výroby (exkrementy, krmiva...),

komunální odpady, kaly, lesní odpady, olejnin, energetické dřeviny a tak dále. [2]

Využití biomasy je předurčeno jejími fyzikálními a chemickými vlastnostmi, jako je výhřevnost, vlhkost a další. Také podílem sušiny, která má vliv na suché a mokré procesy.

Přeměnu biomasy na energetické využití můžeme rozdělit do následujících kategorií:

- termická
- biochemická
- fyzikální a chemická
- získávání tepla při zpracování biomasy (kompostování ...) [3]

4. Vlhkost

Je velmi důležitá vlastnost pro spalování, skladování, využití a zpracovávání organického materiálu, ale i u dalších procesech. Pro většinu případů rostlinných buněk je podíl obsahu vody v buňkách 75% - 90 %, u palivového dřeva 30 – 50 %. Nižší hodnoty vlhkosti má palivová biomasa ze zemědělství. Srovnání hodnot vlhkosti druhů biomasy pro energetické účely jsou zobrazeny v tabulce 1. Zde je vidět jak vyšší obsah vody nepříznivě vplývá na výhřevnost. [4] [6]

Tabulka 1: Obsah vody, výhřevnost a hmotnost materiálů [5]

Druh paliva	Obsah vody	Výhřevnost	Objemová hmotnost		
	[%]	[MJ/kg]	[]	[]	[]
Dřevo obecně	20	14,230			
Buk	15		670	469	275
Buk	50		1116	781	458
Dub	15		695	480	281
Dub	50		1242	799	468
Borovice	15		517	362	212
Smrk	15		455	319	187
Smrk	50		758	531	311
Listnaté dřevo	15	14,605	678	475	278
Listnaté dřevo	50	7,585	1130	791	463
Jehličnaté dřevo	15	15,584	486	340	199
Jehličnaté dřevo	50	8,161	810	567	332
Polena (měkké dřevo)	0	18,560		355	
Polena (měkké dřevo)	0	16,400		375	
Polena (měkké dřevo)	20	14,280		400	
Polena (měkké dřevo)	30	12,180		425	
Polena (měkké dřevo)	40	10,100		450	
Polena (měkké dřevo)	50	8,100		530	
Dřevní štěpka	10	16,400			170
Dřevní štěpka	20	14,280			190
Dřevní štěpka	30	12,180			210
Dřevní štěpka	40	10,100			225
Smrková kůra	15	15,470			
Smrková kůra	60	8,400			
Sláma obilovin	10	15,490		120	(balíky)
Sláma kukuřice	10	14,400		100	(balíky)
Lněné stonky	10	16,900		140	(balíky)
Sláma řepky	10	16,000		100	(balíky)

4.1 Způsob vazby vody v materiálu

Je důležitá vlastnost vlhkosti, která určuje obtížnost jejího odstranění. Dělí se na volnou a vázanou vlhkost.

Volná vlhkost tvoří většinu vody v biomase. Její vlastnost spočívá ve volném uložení vody v látce. Znamená to, že není spojena s molekulami látky. Tato vazba dovoluje vodě volný pohyb v látce. Nachází se na povrchu materiálu, v pórech a makrokapilárách. Volnou vlhkost lze odstranit také mechanicky, jako je například lisování.

Vázaná vlhkost je voda spojena s molekulami látky a její množství je jen asi 5 %.

Její fyzikálně-chemické vlastnosti jsou:

- Slabě nebo vůbec nerozpustí látky rozpustitelné ve volné vodě
- Měrná tepelná kapacita je nižší
- Zamrzá ve velmi nízkých teplotách
- Má vyšší hustotu než volná vlhkost
- Je neelektrovodivá [4]

4.2 Formy vazby vlhkosti

Síla vazby vlhkosti se projevuje rozdílem parciálních tlaků vodní páry na povrchu materiálu a tlaku sytých vodních par, který je menší. Formy vazby určují potřebnou energii na odstranění vody z materiálu. Energie potřebná k odstranění vody lisováním je 3,6 kJ/kg (lze odstranit jen volnou vodu, a materiál se poškozuje), zatím co při sušení je potřeba 2500 – 6000 kJ/kg. [10] Vazby se rozdělují na chemickou, fyzikálně-chemickou a mechanickou.

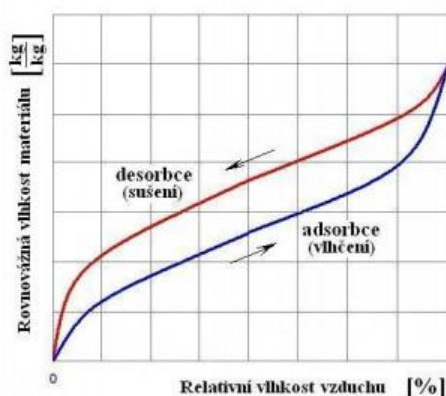
Chemická vazba je nejodolnější a při sušení se neodstraňuje. Její formy jsou hydroxylové ionty a krystalové hydráty.

Fyzikálně-chemická je méně pevná. Zahrnuje adsorpčně a osmoticky vázanou vlhkost.

Mechanická vazba je nejslabší a snadno se odstraňuje během sušení. Je ve formě makro- a mikrokapilár a prakticky se neliší od volné vody. [4]

4.3 Adsorpce a desorpce

Každý materiál má jinou schopnost pohlcovat/udržovat vlhkost z okolního prostředí. Závisí na teplotě a vlhkosti okolního prostředí. Charakterizuje se rovnovážnou vlhkostí. Sorpční izoterma materiálu na obr. 1 určuje sušení, nebo vlhčení závislé na vztahu mezi relativní vlhkostí materiálu a vzduchu.



Obr. 1: Adsorpce a desorpce [4]

Sorpční izoterma určuje nejmenší měrnou vlhkost jakou lze dosáhnout při sušicím prostředí s relativní vlhkostí. Dále lze odhadnout přibližné množství vody vázané monomolekulární a polymolekulární adsorpcí kapilárními silami a podíl volné vody. Izoterma určuje také průběh parciálního tlaku vodní páry na povrchu během všech fází sušení, co je klíčová veličina určující rychlost sušení. [4] [10]

4.4 Určení obsahu vody v materiálu

Vztahy potřebné k určení obsahu vody v materiálu:

Měrná vlhkost:
$$X_s = \frac{m_{h_2o}}{m_s} \quad (1)$$

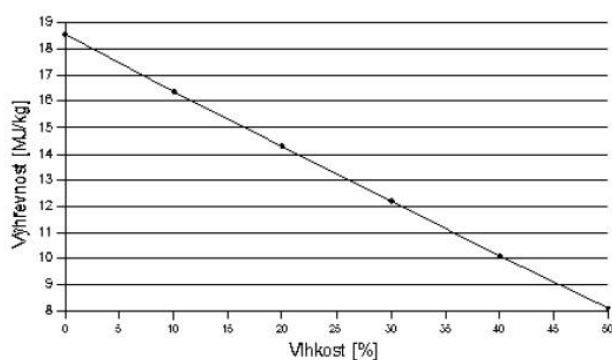
Relativní vlhkost:
$$\omega = \frac{m_{h_2o}}{m_v} \quad (2)$$

Vztahy jsou bez chemicky vázané vody, kterou nelze odstranit tepelným sušením. [4]

5. Sušení biomasy

Je fyzikální proces, při kterém dochází ke snížení obsahu vlhkosti v materiálu za účinku tepla. Dochází ke změně skupenství vody, která se mění z kapalného na plynné a je odváděna do okolního prostředí. Voda má velké výparné teplo, a proto je potřeba nechat biomasu částečně vyschnout. Je to důležité pro energetický zisk z biomasy, který se snižuje při zvyšujícím se obsahu vody v biomase. Vysušení biomasy lze docílit různými metodami sušení. Lze sušit pasivním (bez uměle přidaného tepla, jako je slunce), nebo aktivním (odpadní teplo z procesů, nebo přímý zdroj tepla určený jen pro sušení) sušením.

Pro některé účely jako je lisování pelet a briket je nutná nižší vlhkost. Cílem sušení může být také konzervace potravin, t. j. omezení tvorby bakterií a plísní. [6]



Obr.2: Závislost výhřevnosti biomasy na obsahu vody [11]

Z obr. 2 je vidět, že obsah vlhkosti v biomase má velký vliv na výhřevnost a proto se využívá čím dál častěji umělé sušení biomasy. K sušení může být využito odpadní teplo, solární energie apod. Vlhkost je zde rozdíl vlhkého vzorku dřeva a vzorku dřeva po vysušení, která se vztahuje k vlhkému vzorku. V dřevařském průmyslu se vztahuje na suchý vzorek dřeva. [13]

5.1 Metody sušení

Sušení biomasy není omezeno jen sušením po sklizni a dopravě na sušicí místo. Lze také sušit už před sklizní, nebo při sklizni/těžbě. Proto byly metody rozděleny následovně:

Sušení před sklizní

Jedná se o metodu umrtvení rostliny, která vede k usušení. Tato metoda může být uskutečněna mechanicky a to narušením kůry a kambia, co má to za následek přerušení dodávek vlhkosti a živin do rostliny. Metoda může být uskutečněna i chemicky. Při této metodě dochází k odumření stromu a snížení vlhkosti dřeva ještě před jeho sklizní.

Sušení při těžbě

Metoda se nazývá kyselé kácení. Její princip spočívá v pokácení a ponechání stromů v lese na místě kácení i s větvemi, listy a jehličím. Tato metoda zkracuje dobu sušení o pár měsíců. Také je možné vybrat odumřelé stromy, které mají nižší vlhkost.

Sušení po sklizni

Metoda sušení při níž je potřebné dopravit sušený materiál na místo sušení. Dělí se na:

a) Pasivní sušení

Jedná se o přirozené odstraňování vlhkosti z materiálu na úroveň 20 - 30 %. Materiál je uložen pod přístřeškem s přístupem proudícího vzduchu nebo přímo na slunci. Na povrchu paliva se odpařuje voda, která difunduje ve formě páry do okolního prostředí. Doba vysušení paliva závisí na skladovacích podmínkách (způsobu uložení, teplota, vlhkost, proudění vzduchu) a na specifikaci materiálu (tvar, tloušťka, hustota). **Výhodou** procesu je energetická nenáročnost. **Nevýhodou** jsou velké nároky na prostory a dlouhá doba sušení. Na spalování se může použít vysušený materiál s touto vlhkostí. Na procesy zplynování a výroby pelet je potřeba nižší vlhkosti, proto je nutno zvolit jiný způsob sušení.

b) Aktivní sušení

Je urychlený proces sušení za cílem snížit vlhkost na menší hodnotu jako při pasivním sušení. Suší se za pomoci přiváděného tepla ze zdroje energie. Zdrojem energie k ohřevu vzduchu může být odpadní teplo nebo přímá vytápěcí jednotka. Je důležité aby mněl vzduch dostatečné proudění a požadované parametre. [7]

5.2 Parametre sušení

Každý sušený materiál požaduje jiné parametre sušení. Tyto parametre jsou:

Sušící médium: Lze použít vzduch, páru, inertní plyn a spaliny. Závisí na druhu sušeného materiálu. Jeho vlastnosti charakterizuje vlhkost, teplota, hustota a entalpie.

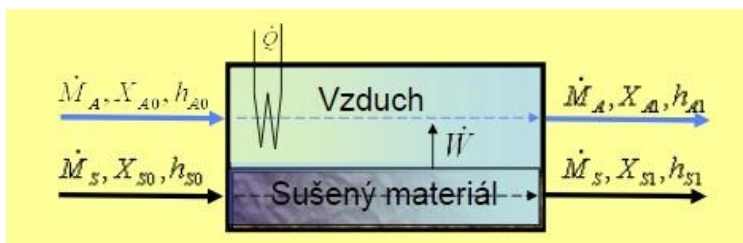
Teplota: Maximální výška teploty je dána kvůli zamezení možnému poškození sušeného materiálu, ale i sušící metodou. Čím je teplota vyšší, tím je doba sušení rychlejší ale i nákladnější kvůli vyšším tepelným ztrátám.

Rychlost proudění sušícího média: Čím je rychlost proudění vyšší, tím je proces sušení rychlejší. Rychlost je limitována vnosem částic sušeného materiálu, to znamená, že příliš vysoká rychlost by mohla odnášet sušený materiál.

Doba sušení: Je nejdůležitější parametr při sušení materiálů. Stanovení doby sušení není jednoduché. Používají se empirické vzorce opatřené opravnými koeficienty, které zahrnují různé vlivy na sušení. Hlavními vlivy jsou tvar a vlastnost sušené látky, vlhkost, styk sušícího média s látkou, teplota, sušící médium a další. [9]

5.3 Statika sušení

Z parametrů vstupního proudu vzduchu (teplota, vlhkost, hmotnostní průtok) a z požadované výstupní vlhkosti materiálu lze vypočítat vlhkost a teplotu vzduchu, který sušárnu opouští viz. obr. 3. Statika sušení pozůstává z hmotnostní a tepelné bilance účinnosti sušení. K výpočtu je potřeba znát rovnice (3-7). Velký vliv na účinnost má směr proudění. Směr může být řešen souproudem a protiproudem. [10] [12]



Obr.3: Bilance sušení [12]

Hmotnostní bilance:
$$\dot{M}_A X_{A0} + \dot{M}_S X_{S0} = \dot{M}_A X_{A1} + \dot{M}_S X_{S1} \quad (3)$$

Hmotový průtok
$$\dot{W} = \dot{M}_A (X_{A1} - X_{A0}) = \dot{M}_S (X_{S0} - X_{S1}) \quad (4)$$

Tepelná bilance:
$$\dot{Q} = \dot{M}_A(h_{A1} - h_{A0}) + \dot{M}_S(h_{S1} - h_{S0}) \quad (5)$$

Měrná spotřeba tepla
$$\frac{\dot{Q}}{\dot{W}} = \frac{h_{A1} - h_{A0}}{X_{A1} - X_{A0}} + \frac{h_{S1} - h_{S0}}{X_{S0} - X_{S1}} \quad (6)$$

Účinnosti sušení:
$$\eta = \frac{\text{teplo spotřebované na odpaření}}{\text{teplo dodané}} = \frac{T_{A1} - T_{A2}}{T_{A1} - T_{A0}} \quad (7)$$

5.4 Kinetika sušení

Určuje jak dlouho je potřeba materiál sušit a jak má být kontinuální pásová sušárna dlouhá, aby bylo dosaženo požadovaných parametrů. Způsoby analýzy se liší podle typu sušárny. Jsou to experimenty a experimentální data. Ty se získávají z křivky sušení.

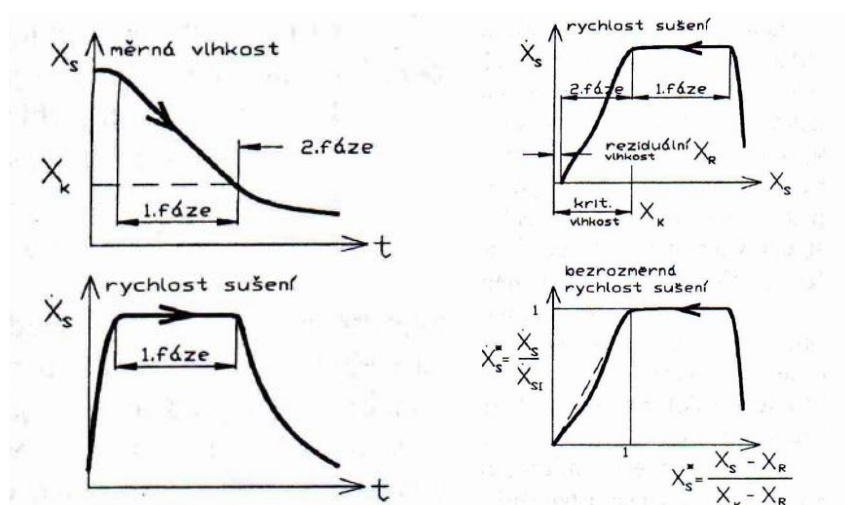
Sušicí křivka je dána experimentálním sušením materiálu při konstantních parametrech sušicího prostředí. Křivka je závislost měrné vlhkosti materiálu X_s na čase viz. obr. 4.

Rychlost sušení \dot{X}_s je záporně vzatá časová derivace měrné vlhkosti.

Bezrozměrná vlhkost materiálu je:
$$X_s^* = \frac{X_s - X_R}{X_K - X_R} \quad (8)$$

,kde X_R je zbytková vlhkost, X_K je kritická vlhkost (první fáze – odstranění volné vody).

Zobecněná sušicí křivka je závislost bezrozměrné rychlosti sušení \dot{X}_s^* na bezrozměrné vlhkosti vzorku X_s^* a může být použita pro popis sušení v reálných podmínkách. [10]



Obr.4: Sušicí křivky [10]

6. Sušárny

Sušárna je zařízení sloužící k odstranění vlhkosti materiálu vypařováním nebo sublimací, za pomoci přiváděného tepla uvnitř zařízení. Rozdělení podle druhu přívodu tepla:

- **konvektivní sušárny** (ofukovaná/profukovaná nehybná vrstva, impaktní, pěnová, bubnová, šachtová sesypná, fluidní, vibrofluidní, proudová a rozprašovací sušárna)
- **kontaktní sušárny** (válcová, bubnová, lopatková a sublimační sušárna)
- **radiační sušárny** (infračervená, dielektrická a mikrovlnná sušárna)

Dále se rozděluje podle kritérií, kterými je **sušící médium** (vzduch, spaliny, inerty, vakuum), **provozní tlak** (atmosférické, přetlakové a vakuové sušárny), **pohybu sušeného materiálu** (mechanický, pneumatický, v klidu), **proudění sušícího média** (fluidní, proudové), **provoz** (kontinuální, diskontinuální).

Při výběru sušárny mohou pomoci informace o sušené látce, požadované kapacitě látky, tepelném výkonu a režimu provozu sušárny. [10]

6.1 Bubnová rotační sušárna

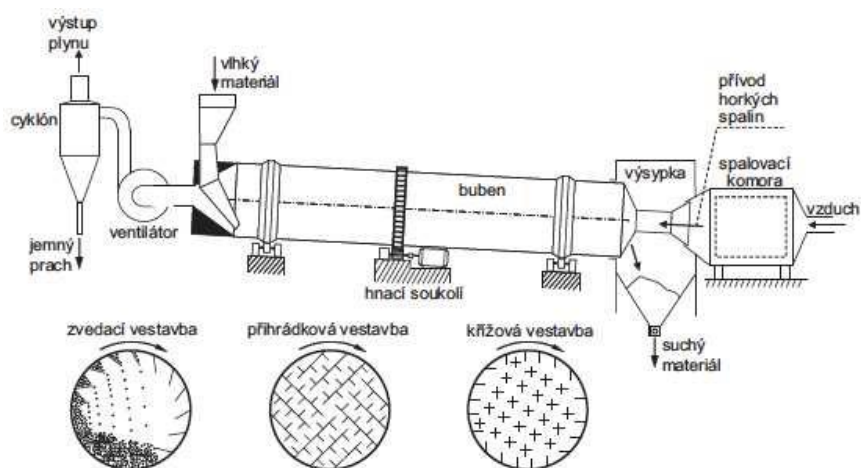
S konvektivním otopem

Je zařízení určené k vysoušení sypkých materiálů, chemikálií a potravin. Zařízení pozůstává ze zásobníku mokré suroviny se sítem, šnekového dopravníku, pomalu rotujícího bubnu, ventilátoru a cyklónu viz. obr. 5. Sypký materiál je vytríděný od hrubých kusů sítem a dále pokračuje do zásobníku, odkud se dopravuje šnekovými dopravníky do bubnu. Buben je poháněn ozubeným kolem a je pod mírným sklonem. Sklon umožňuje posun materiálu sesypáváním na konec bubnu a zlepšuje účinnost sušení. Do bubnu se umísťují vestavby viz. obr. 5. Vestavba přesypává materiál za účelem zvýšení plochy sušeného materiálu.

Ventilátory jsou použity k usměrnění proudu horkého vzduchu souproudem, nebo protiproudem. Vysušený materiál je odváděn šnekovým dopravníkem. Materiál se většinou suší horkými spaliny z kotle o teplotě 300 – 500 °C souproudem. Po vysušení jsou spaliny spolu s vlhkostí odváděny do cyklónu, kde se zbavují prachových částic nabraných z pilin.

S kontaktním otopem

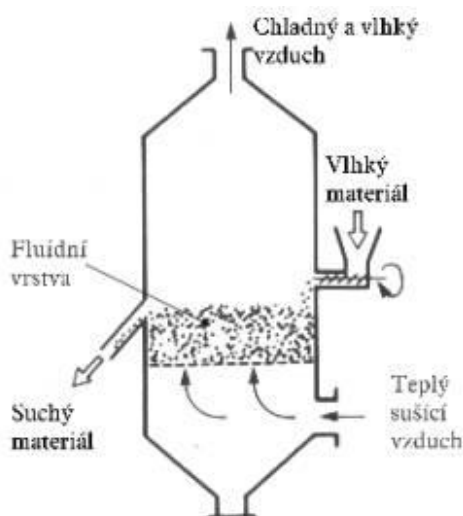
Provedení sušárny je téměř totožné s bubnovou sušárnou s konvektivním otopem. Rozdíl je v přenosu tepla směnnou plochou a topným médiem vodnou párou, která tyto trubky uvnitř vyhřívá. [10] [7] [8]



Obr.5: Bubnová sušárna s konvektivním otopem [8]

6.2 Fluidní sušárna

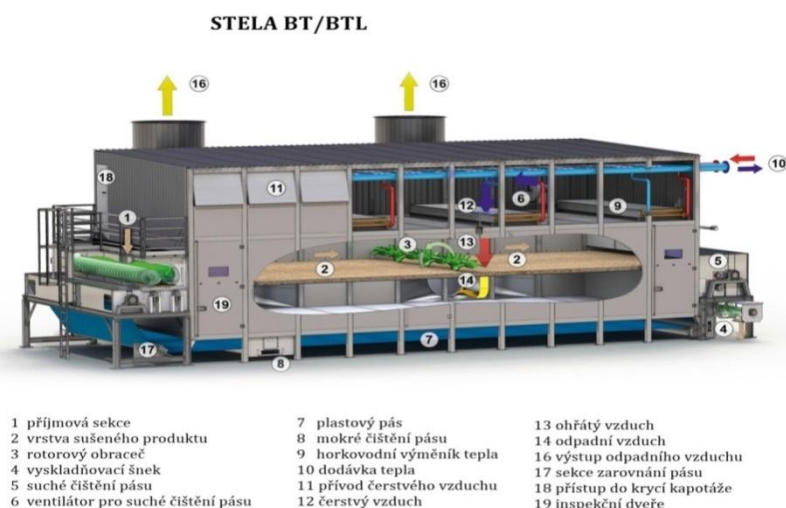
Je typ sušárny méně náročné na prostor. Používá se k sušení sypkých materiálů, chemikálií i potravin, které mají podobný rozsah velikostí částic. Materiál je přiváděn do komor a profukován zespodu sušícím médiem. Médium nadzvedá materiál. Tímto způsobem je sušený materiál ve větším kontaktu se sušícím plynem co zvyšuje účinnost sušení. Sušícím médiem může být vzduch nebo spaliny. Médium je přiváděno do tlakové komory umístěné pod sušící plochou skrz perforovanou podlahu. Vlhký vzduch vystupuje malou rychlostí, a proto není nutno filtrovat vodní páry, protože obsahují minimální množství unášených částic. Sušárna se vyznačuje malou energetickou náročností a nízkými tlakovými ztrátami. [6] [8]



Obr.6: Fluidní sušárna [8]

6.3 Pásová sušárna

Je používána ve velkých průmyslových provozech k sušení dřevěných pilin, štěpky, obilí a podobných zemědělských produktů. Zařízení pozůstává z hlavních částí: prodyšného sušícího pásu na pásovém dopravníku, dávkovacích šnekových dopravníků a ventilátoru viz. obr. 7. Vlhký materiál je pomocí šnekového dopravníku vložen souvislou vrstvou o tloušťce 10 – 15 cm na prodyšný pás poháněný elektromotorem. Odtud je dopravován souvisle s pásem až na konec pásového dopravníku. Prodyšný pás je plastové spirálové síto pohybující se po válečcích a krajních vodících lištách. Na materiál je vháněn ohřátý vzduch (50 – 70 °C). Vzduch je ohříván pomocí radiátorů topné soustavy a prochází prodyšným pásem za pomoci podtlaku vytvořeného ventilátorem pod pásem. Výhodou je šetrné sušení materiálu při nízkých teplotách a velkém objemu proudícího vzduchu. [6] [7]



Obr.7: Pásová sušárna [14]

6.4 Rourová sušárna

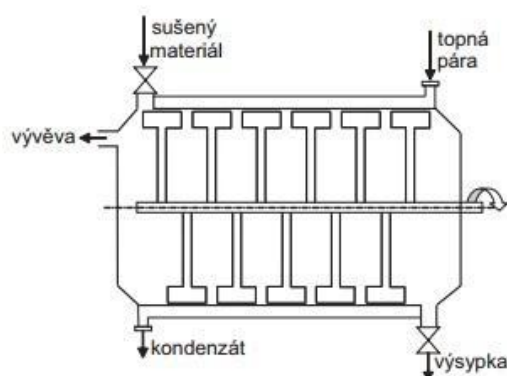
Je vhodná pro materiály s velikostí částic do délky 5 mm a průměru 3 mm. Jedná se o dřevné piliny a drť, šrotovanou slámu, seno a stonky kukuřice. Sušený materiál proudí potrubím díky ventilátoru poháněného elektromotorem. V potrubí je ohříván spaliny z kotle, který je navržen na míru. Pro zvýšení efektivity sušení obsahuje sušička zpomalovací difuzory. Výhodou je snadná výměna dílů, protože je vše spojeno přírubami. Na konci potrubí se nachází cyklónový odlučovač, který odděluje pevné částice materiálu od spalin. Materiál je možno vysušit na 8 – 15% vlhkost. [6]



Obr.8: Rourová sušárna [15]

6.5 Lopatková sušárna

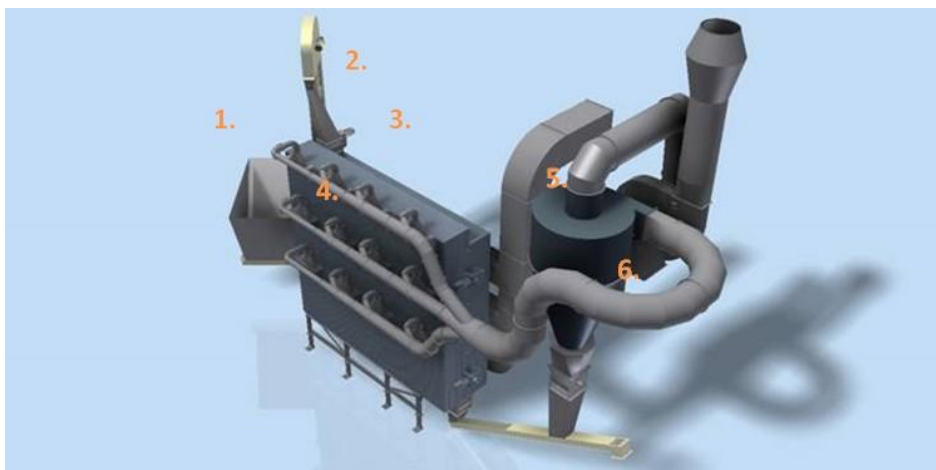
Je určena k sušení obtížně míchatelných materiálů, dřevný štěpky, organických zbytků a odpadů s nepravidelnou strukturou. Materiál je přiveden do bubnu a promícháván lopatky. Prouděním sušícího média a otáčením lopatek je materiál posouván ke konci bubnu a odveden. K sušení lze využít odpadní teplo nebo horké spaliny. [6] [8]



Obr.9: Lopatková sušárna [8]

6.6 Šneková sesypná sušárna

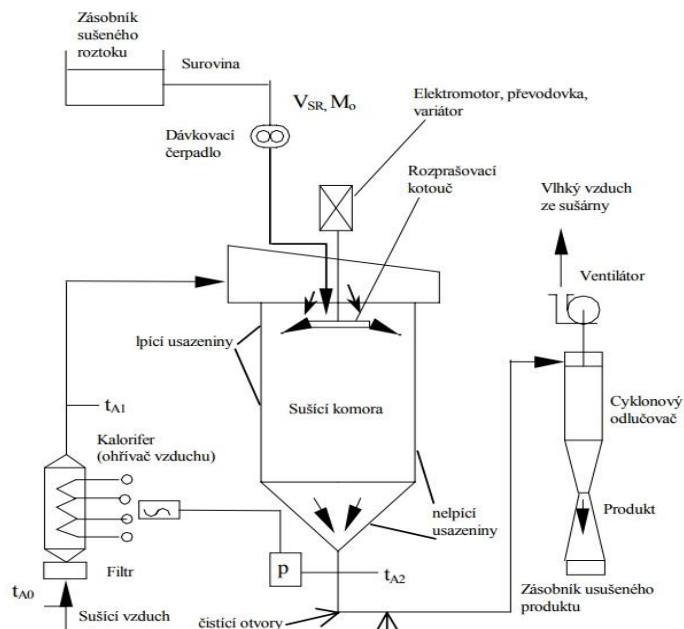
Sušit lze zemědělské produkty, kaly a piliny. Suška využívá odpadní teplo z bioplynových stanic. Jedná se o odpadní teplo z kogeneračních jednotek. Spaliny mají 450 °C a chladicí voda 90 °C. Suška se skládá ze šnekových dopravníků umístěných nad sebou. Biomasa přepadáva shora dolů. Materiál je dopraven do násypky a dále pokračuje dolů po šnekových dopravnících. Do prostoru sušárny je přiváděn horký vzduch nebo spaliny z kotle. Vysušený materiál je možné ihned odvádět na další zpracování (peletování, briketování). Prachové částice lze odstranit v cyklonu nebo možno připojit filtr. Složení částí sušky je na obr. 10: 1.Násypka, 2. Elevátor, 3. Turniket, 4. Sušárna, 5. Cyklón, 6. Vynášecí šnek. [6] [16]



Obr.10: Šneková sesypná sušárna [6]

6.7 Rozprašovací sušárna

Funguje na principu transformace kapaliny na suchý prášek. Pomocí rotačního kotouče nebo trysky je kapalina dezintegrována na kapičky. Kapičky přichází do styku s horkým médiem, které rychle vypaří vodu na povrchu sušeného materiálu. Po vypaření zvyšuje teplotu na povrchu sušeného materiálu. Používá se vzduch o vysoké teplotě. Suchý materiál se oddělí od sušícího média v cyklonu. Suší se drobné částice ve formě prášku (kakao, káva a čaj). [17] [8]



Obr.11: Rozprašovací sušárna [17]

6.8 Mikrovlnná sušárna

Vyznačuje se mikrovlny použity k ohřevu sušeného materiálu s frekvencí 900 – 2450 MHz. Suší se kusový, sypký, kašovitý i tekutý materiál. Zařízení je složeno z generátoru se zdroji mikrovlnné energie, magnetronů, ozařovacích komor a dopravníku. Mikrovlnné sušení je účinnější díky hloubkovému působení mikrovln. Při sušení se ohřívá i vnitřek sušeného materiálu. Vlhkost je vytěšňována k místu s nižším tlakem, t. j. na povrch. Díky tomu se nevytváří na povrchu suchá vrstva a nepřerušuje tak kapilární tok, jako u konvekčního sušení. Tento typ sušárny vykazuje vysokou energetickou účinnost. [8] [18]

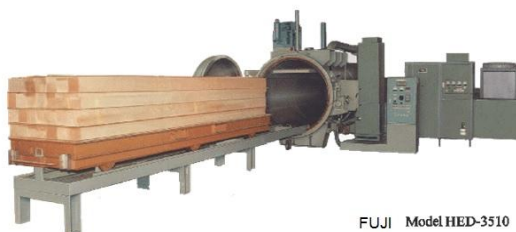


Obr.12: Mikrovlnná sušárna [18]

6.9 Sušárna s dielektrickým ohřevem

Zařízení funguje na principu polarizace dielektrika. Voda je polární látka a má molekuly ve tvaru dipólu. Při změně elektrického pole se dipóly natáčí. Tenhle typ sušárny je možné použít pro sušení dřeva a papíru, ale i k úpravě plastických hmot. Rychlost dielektrického ohřevu je od 3 do 40 hodin. Je rychlejší než sušení médiem. Při dielektrickém ohřevu vzniká nerovnoměrnost ohřevu vlivem různé vlhkosti vrstev a anizotropních vlastností dřeva. [8] [19]

Vakuová sušička dřeva



- Výkon: 6-200 kW
- Kapacita sušičky: 1 m³
- Tlak: 5,3-8 kPa
- T_v 34-41 °C

18

Obr.13: Sušárna s dielektrickým ohřevem [19]

6.10 Sušárna s infračerveným zářením

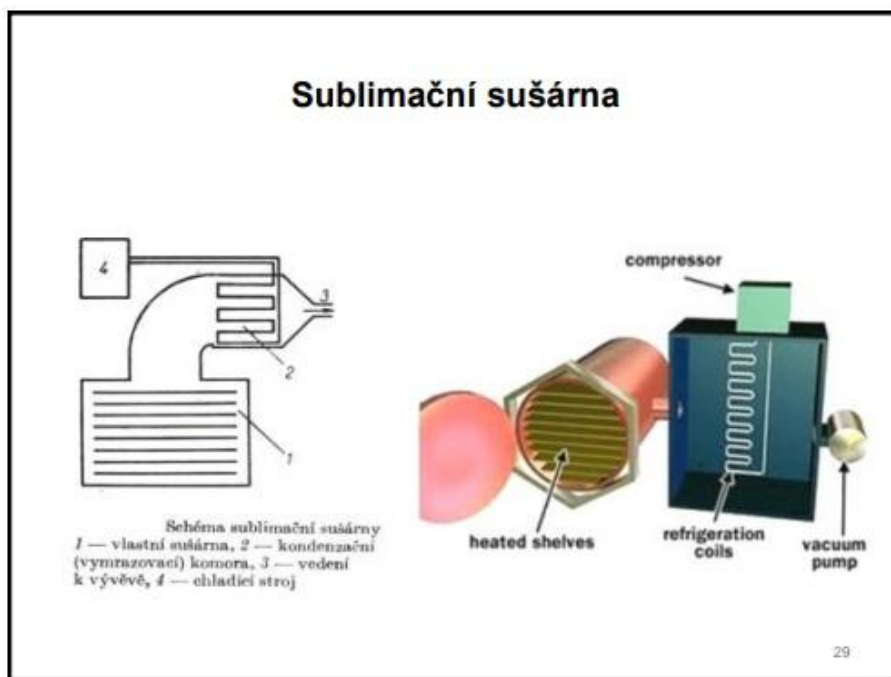
Tento typ sušárny je používán v automobilovém průmyslu k sušení nátěrů, ale i papíru a potravin. Princip zařízení spočívá v odporově vyhřívaných tělískech ke katalytickému spalování plynu. Tělíska slouží k vytváření teploty na povrchu sušeného materiálu. [8]



Obr.14: Sušárna s dielektrickým ohřevem [20]

6.11 Sublimační sušárna

Zpracovává krevní plasmu, kávu, huby, ovoce a zeleninu. Sušení pracuje na principu rychlého zmrazení sušeného materiálu vakuovým chlazením, vzduchem nebo kapalným plynem. Po zmrazení vznikají krystalky vody chránící buňky sušeného materiálu. Krystalky se při tlaku 10 – 100 Pascalů sublimují přivedeným teplem. Nesmí se překročit teplota tání ledu. Tento princip je velmi nákladný a náročný. [8]



Obr.15: Sublimační sušárna [21]

6.12 Porovnání sušáren a vhodný výběr

Tento odstavec porovnává zmíněné sušárny podle čtyř kritérií. Porovnání je vhodné pro přehled a k určení správného typu sušárny. Je dáno podle kritérií: **typ materiálu** vhodného pro sušení, **kapacita materiálu za čas**, který je sušárna schopna materiál vysušit, **tepelný výkon** potřebný k vysušení materiálu, **druh sušícího média** použitý k sušení materiálu. [10]

Vysvětlivky k tabulce:

S – suspenze (pevné látky v kapalině), P – pastovité materiály, R – partikulární materiály (sytké materiály), ML – nízká, MM – střední, MH – vysoká, QL – nízký, QM – střední, QH – vysoký, Vz – vzduch, S – spaliny, I – inerty, Va – vakuum

Kritérium: + znamená, že sušárna vyhovuje, - nevyhovuje, O záleží na okolnostech [10]

Tabulka 2: porovnání sušáren podle zadaných kritérií [16]

	Materiály			Kapacita materiálu [kg/čas]			Tepelný výkon [kW]			Sušící médium			
	S	P	R	ML	MM	MH	QL	QM	QH	Vz	S	I	Va
Typ sušárny:													
Bubnová rotační	-	O	+	+	+	O	+	+	O	+	+	-	-
Fluidní	-	O	+	+	+	+	+	+	+	+	+	-	-
Pásová	-	O	+	+	+	O	+	+	O	+	-	-	-
Rourová	-	-	+	-	+	+	O	+	+	-	+	-	-
Lopatková	O	+	+	+	+	-	+	O	-	+	+	-	-
Šneková sesypná	-	-	+	+	+	+	+	+	+	+	+	-	-
Rozprašovací	+	O	-	+	+	+	+	+	+	+	-	-	-
Mikrovlnná	+	+	+	+	O	-	+	O	-	-	-	-	-
Dielektrický ohřev	-	O	+	+	+	O	+	+	O	-	-	-	+
Infračervené záření	O	+	+	+	O	-	+	-	-	-	-	-	-
Sublimační	O	+	+	+	O	-	+	+	-	+	-	+	+

Pro zvolený materiál odpadní štěpka jsou vhodné sušárny: bubnová rotační, fluidní, pásová, rourová, lopatková, šneková sesypná a mikrovlnná sušárna. Vzhledem k energetické náročnosti sušení je vhodná **bubnová rotační sušárna s kontaktním ohřevem** pro její nejlepší využití tepelné energie.

7. Experimentální část

Pro návrh zvolené **rotační bubnové sušky s kontaktním ohřevem**, která bude sušit zvolený materiál - **dřevní štěpku** je potřeba znát experimentálně určené charakteristiky. Těmito charakteristiky jsou sušící křivka, měrná odpařivost a energetická náročnost. Pro získání těchto charakteristik byl vykonán experiment č.1. Experiment č.2 má určit vliv míchání sušeného materiálu na proces sušení.

7.1 Experiment č.1 Sušení s mícháním

Hlavním znakem experimentu je sušení štěpky s vysokým obsahem vody v kampaňovité sušárně s **rotujícími lopatky**.

Experiment probíhal v prostorách laboratoří ČVUT na Julisce, kde se kampaňovitá sušárna nachází. Pro sušení byla použita štěpka s vysokým obsahem vody a objemem 7 litrů. Štěpka byla zvážena digitální vahou. Elektrický proud potřebný k vyhřátí sušárny a k sušení biomasy byl změřen za pomoci zásuvkového elektroměru.

Kampaňovitá sušárna je válec s délkou 1 m a vnitřním průměrem 26 cm umístěným na stojanu. Válec má elektrický otop a termostat nastaven na 140 °C. Úniku tepla brání tepelná izolace, v které se nachází malý otvor pro odvod vodní páry ze sušeného materiálu. Pohon je řešen elektromotorem s převodovkou a řetězovým převodem, který pohání lopatkové míchadlo uvnitř sušárny pro lepší účinnost sušení. Lopatkové míchadlo lze vytáhnout (důležité pro plnění bubnu sušeným materiálem) po demontáži krytu izolace a kovového krytu bubnu uchyceného šrouby.



Obr.16: Kampaňovitá sušárna

Postup sušení

Plnění kampaňovité sušárny je řešeno ručním vkládáním po sundání krytu izolace, přišroubovaného víka a vyndáním lopatkového míchadla. Rovnoměrné rozmístění sušeného materiálu uvnitř bubnu sušárny je také řešeno ručně. Po rozehrátí vnitřku (potřebných 1,68 kWh el. energie) se vloží a rovnoměrně rozmístní mokrá štěpka zvážená na digitální váze. Po montáži krytů nastane proces sušení. Sušení probíhá 3 hodiny. Po každé hodině se sušená štěpka znovu zváží (co nejrychleji aby nedocházelo k jejímu ochlazení, také ochlazení vnitřku sušárny) a odebere vzorek pro zjištění vlhkosti (celkem 4 krát) viz. tabulky 3-6.



Obr.17: Kampaňovitá sušárna se štěpkou uvnitř

Pro sušení byla použita štěpka s vysokým obsahem vody. Pro zjištění obsahu vody bylo potřeba odebrat více vzorků štěpky a rozdělit je do misek. Misky byly pak zváženy a vysušeny ve speciální sušárně na téměř nulovou hodnotu vlhkosti. Vlhkost se měřila ve čtyřech intervalech: původní vzorek štěpky s vysokým obsahem vody, štěpka sušená hodinu, dvě a tři hodiny.



Obr.18: mokrá štěpka (vlevo) a speciální sušárna (vpravo)

Z naměřených hodnot byly sestaveny tabulky pro čtyři měření. Tabulky obsahují hmotnosti misek, hmotnost štěpky před a po sušení, hmotnost odpařené vody, vypočtené vlhkosti a spotřebu elektrické energie. Dále byly vypočítány potřebné hodnoty pro pozdější návrh sušárny. Těmito hodnotami jsou **teplo-směnná plocha, objem, doba sušení a množství odebrané vody z 50% vlhkosti na 20% vlhkost, měrná odpařivost a spotřeba tepla na 1kg odpařené vody.**

7.1.1 Zjištěné hodnoty z experimentu

Získané experimentální data byly vloženy do čtyřech tabulek:

Počáteční stav štěpky

Tabulka 3: Výsledky měření počátečního stavu sušené štěpky

Speciální sušárna					
Číslo misky		17	15	12	16
Hmotnost misky [g]		41,902	42,230	39,253	40,369
Hmotnost misky + štěpky před sušením [g]		71,740	67,734	72,377	68,799
Hmotnost misky + sušina [g]		53,248	53,106	53,296	52,148
Hmotnost štěpky před sušením [g]		29,838	25,504	33,124	28,430
Hmotnost sušiny [g]		11,346	10,876	14,043	11,779
Vlhkost [%]		61,975	57,356	57,605	58,568
Kampaňovitá sušárna					
Hmotnost štěpky [kg]		3,3			
Elektrina pro ohřev sušárny [kWh]		1,68			

Po 1. hodině sušení

Tabulka 4: Výsledky měření sušení štěpky po hodině

Speciální sušárna				
Číslo misky		5	1	11
Hmotnost misky [g]		48,279	45,211	39,296
Hmotnost misky + štěpky před sušením [g]		58,184	55,802	50,080
Hmotnost misky + sušina [g]		53,308	50,565	44,820
Hmotnost štěpky před sušením [g]		9,905	10,591	10,784
Hmotnost sušiny [g]		5,029	5,354	5,524
Vlhkost [%]		49,228	49,448	48,776
Kampaňovitá sušárna				
Hmotnost štěpky [kg]		2,25		
Hmotnost odpařené vody [kg]		1,05		
Elektrina na ohřev štěpky [kWh]		0,89		

Po 2. hodině sušení

Tabulka 5: Výsledky měření sušení štěpky po dvou hodinách

Speciální sušárna			
Číslo misky	15	16	12
Hmotnost misky [g]	42,240	40,376	39,257
Hmotnost misky + štěpky před sušením [g]	49,728	47,619	45,766
Hmotnost misky + sušina [g]	47,476	45,171	43,615
Hmotnost štěpky před sušením [g]	7,488	7,243	6,509
Hmotnost sušiny [g]	5,236	4,795	4,358
Vlhkost [%]	30,075	33,798	33,047
Kampaňovitá sušárna			
Hmotnost štěpky [kg]	1,55		
Hmotnost odpařené vody [kg]	0,7		
Elektrina na ohřev sušárny [kWh]	1		

Po 3. hodině sušení

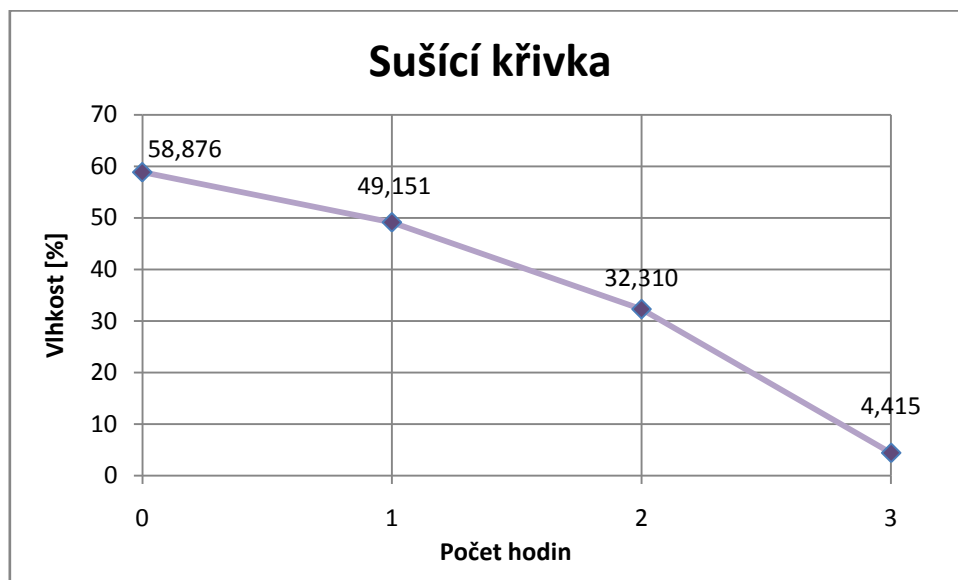
Tabulka 6: Výsledky měření sušení štěpky po třetí hodině

Speciální sušárna, vzorky				
Číslo misky	1	5	17	11
Hmotnost misky [g]	45,211	48,279	41,902	39,296
Hmotnost misky + štěpky před sušením [g]	52,385	57,625	49,792	47,604
Hmotnost misky + sušina [g]	52,089	57,399	49,611	46,871
Hmotnost štěpky před sušením [g]	7,174	9,346	7,890	8,308
Hmotnost sušiny [g]	6,878	9,120	7,709	7,575
Vlhkost [%]	4,126	2,418	2,294	8,823
Kampaňovitá sušárna				
Hmotnost štěpky [kg]	1			
Hmotnost odpařené vody [kg]	0,55			
Elektrina na ohřev sušárny [kWh]	0,62			

Data z tabulek byly následně použity pro další výpočty parametrů potřebných k návrhu sušky.

7.1.2 Křivka sušení

Z naměřených dat byla sestavena **křivka sušení**. Na křivce jsou zobrazeny hodnoty vlhkosti štěpky v odebrány v dané hodině. Sušící křivka je dále potřebná k určení měrné odpařivosti pro návrh bubnové sušárny v další kapitole.



Obr.19: Graf sušící křivky

7.1.3 Měrná odpařivost

Byli vypočteny dva druhy měrné odpařivosti. První se týká experimentu, kde je vidět změnu její hodnoty po každé hodině a je vzata celá vlhkost materiálu. Druhá je potřebná pro návrh sušky. Je vypočtena pro vlhkost z 50 % na 20 %, jak je určeno v zadaných parametrech návrhu sušky. Pro výpočet bylo nutno nejdříve vypočíst objem a teplo-směnnou plochu. Dále bylo potřeba vypočíst pro vlhkost z 50 % na 20 % dobu sušení a množství odebrané vody.

Objem a teplo-směnná plocha

Vychází z daných rozměrů bubnu laboratorní sušárny, z vnitřního průměru 26cm a délky 1m. Z těchto údajů lze vypočíst objem a teplo-směnnou plochu (počítá se celá otápená plocha i ta, které se sušený materiál nedotýká), která přenáší teplo na sušené uvnitř sušárny.

Teplo-směnná plocha: $S_{pl} = 2 \cdot \pi \cdot d \cdot l = 2,3,14 \cdot 0,26 \cdot 1 = 1,634 \text{ m}^2$ (9)

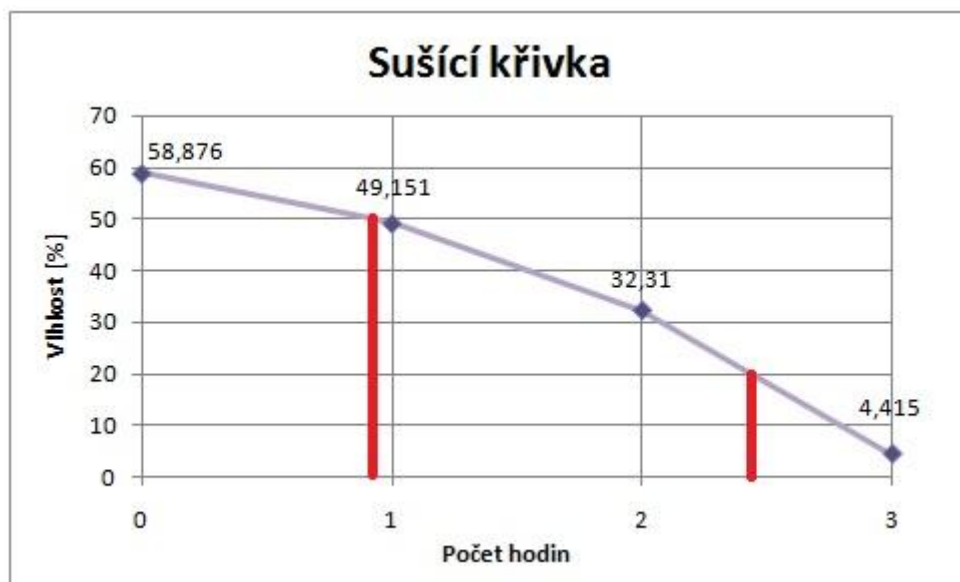
Objem: $V = \pi \cdot r^2 \cdot l = 3,14 \cdot 0,13^2 \cdot 1 = 0,053 \text{ m}^3$ (10)

Doba sušení a množství odpařené vody pro vlhkost z 50 % na 20 %

Doba sušení byla vypočtena z grafu **sušící křivky** obr. 20. Pro odečet byl zvolen počáteční bod 0 hodin. Byl vytvořen průsečík sušící křivky mezi 0-1 hodinou sušení a přímkou s 50% vlhkostí. Byla vypočtena rovnice křivky: $y = -0,10283 \cdot x + 6,05409$. Nakonec byl vytvořen a průsečík křivky sušení mezi 2-3 hodinou sušení a přímkou s 20% vlhkostí. Z úseku byla vypočtena rovnice křivky $y = -0,03586 \cdot x + 1,15848$. Počet hodin pro vlhkost z 50 % na 20 % byl sečten z rozdělených úseků 0-1, 1-2 a 2-3. Doba sušení přibližně **1,53 hodiny**.

Pro zjištění množství odpařené vody ze štěrky byl také použit graf **sušící křivky**. Postup byl stejný. Graf byl rozdělen na tři úseky 0-1, 1-2 a 2-3 hodina. Následně po zjištění odpařené vody v jednotlivých úsecích bylo sečteno výsledné celkové množství **1,035 kg vody**.

Průměrné množství **za hodinu je 0,676 kg**



Obr.20: Graf odečtu doby sušení ze sušící křivky

Měrná odpařivost

Určuje množství odpařené vody vztažené na plochu, nebo objem. Odpařivost je hlavním parametrem pro návrh rozměrů sušky. Je závislá na 4 parametrech: obsahu vody v sušeném materiálu, teplotě topného média, zaplnění bubnu sušárny, rotaci bubnu a sklonu. [22] [23]

Měrná odpařivost plošná :

$$O_p = \frac{W}{S_{pl}} \quad (11)$$

Měrná odpařivost Objemová :

$$O_o = \frac{W}{V} \quad (12)$$

Měrná odpařivost zvolená pro oblast 58,8-4,42 % vlhkosti

Jedná se o celou dobu sušení rozdělenou na úseky po hodině. U každé hodiny je vidět jiné množství odpařené vody a z toho i jiné hodnoty měrných odpařivostí. Může to být způsobeno nehomogeností materiálu. Menší částice se vysuší rychleji než ty velké. Také to může být způsobeno volnou vodou na povrchu, která se odpaří dřív, než voda uvnitř materiálu.

Tabulka 7: Měrná odpařivost objemová a plošná pro rozsah vlhkosti 58,8-4,42 % podle hodin sušení

	Odpařená voda [kg/h]	Měrná odpařivost plošná [kg/h.m ²]	Měrná odpařivost objemová [kg/h.m ³]
po 1 hodině	1,050	0,643	19,811
po 2 hodině	0,700	0,428	13,208
po 3 hodině	0,550	0,337	10,377

Měrná odpařivost zvolená pro oblast 50-20 % vlhkosti

Je vypočtena k průměrné hodině. Pro návrh byla vypočtená měrná odpařivost plošná, proto že se jedná o přenos tepla kondukcí. Pro porovnání i objemová. Objemová odpařivost se používá při přenosu tepla konvekcí, t. j. vzduchem, nebo spaliny. Pro výpočet bylo použito průměrné množství 0,676 kg/h odpařené vody.

Tabulka 8: Měrná odpařivost objemová a plošná pro rozsah vlhkosti 50-20 %

	Odpařená voda [kg/h]	Měrná odpařivost plošná [kg/h.m ²]	Měrná odpařivost objemová [kg/h.m ³]
Zprůměrovaná hodina	0,676	0,414	12,755

7.1.4 Energetická náročnost

Cílem je zjistit **energetickou ztrátu** po odečtení teoretického tepla od skutečně změřeného tepla. K tomu je zapotřebí hmotnostní a tepelné bilance.

Hmotnostní bilance

Množství štěpky: $M_{sp,exp} = 3,3 \text{ kg}$

Množství sušiny: $M_{suš,exp} = 1 \text{ kg}$

Množství odpařené vody: $M_{w,exp} = 2,3 \text{ kg}$

Množství dodaného tepla (skutečné)

Je vypočteno z experimentálně zjištěných hodnot kampaňovité sušárny. Na 2,3 kg odpařené vody bylo spotřebováno 2,51 kWh elektrické energie. Podle přepočtu $Q_c = 9036 \text{ kJ}$.

$$\text{Teplo dodané pro odpaření 1 kg vody: } Q_{skut} = \frac{Q_c}{M_{w,exp}} = \frac{9036}{2,3} = 3\,924 \text{ kJ} \quad (13)$$

Pro přepočet byla použita kalkulačka TZB-INFO [24].

Množství dodaného tepla (teoretické)

Je teplo teoretické, co znamená teplo beze ztrát. Teplo je vypočteno z hmotnostní a tepelné bilance a je dále použito pro výpočet tepelných ztrát.

K ohřevu:

$$\text{Sušiny: } Q_{os} = c_s \cdot M_{suš,exp} \cdot \Delta t = 2,383 \cdot 1 \cdot (100 - 20) = 190 \text{ kJ} \quad (14)$$

$$\text{Vody: } Q_{ov} = c_v \cdot M_{w,exp} \cdot \Delta t = 4,183 \cdot 2,3 \cdot (100 - 20) = 769,7 \text{ kJ} \quad (15)$$

$$\text{Odpaření vody: } Q_{oD} = r_{FG} \cdot M_{w,exp} = 2\,257 \cdot 2,3 = 5\,191,1 \text{ kJ} \quad (16)$$

$$\text{Celkové: } Q_c = Q_{os} + Q_{ov} + Q_{oD} = 190 + 769,7 + 5\,191,1 = 6\,150,8 \text{ kJ} \quad (17)$$

Postup výpočtu byl převzat z [6].

$$\text{Teplo dodané pro odpaření 1kg vody: } Q_{teor} = \frac{Q_c}{M_{w,exp}} = 2\,674 \text{ kJ} \quad (18)$$

Tepelná ztráta

Je rozdíl skutečného a teoretického množství tepla. Z výpočtu byla zjištěna tepelná ztráta ve výši 31,86 % a opravný součinitel 1,467. Opravný součinitel bude použit pro přesnější výpočet potřeby tepla při návrhu sušárny.

$$Q_z = Q_{skut} - Q_{teor} = 3\,924 - 2\,674 = 1\,250 \text{ kJ} \quad (19)$$

$$Q_{opr} = \frac{Q_{skut}}{Q_{teor}} = 1,467 \quad (20)$$

7.1.5 Vyhodnocení experimentu

Cílem experimentu bylo zjistit průměrnou vlhkost sušeného materiálu na začátku a během procesu sušení, dobu sušení a množství odebrané vody při sušení z 50 % na 20 % vlhkosti, plošnou a objemovou odpařivost a spotřebu tepla na 1 kg odpařené vody. Počáteční průměrná vlhkost byla 58,8 %, po první hodině 49,15 %, po druhé hodině 32,31 %, třetí hodině 4,42 %. Při procesu sušení v délce 3 hodin bylo odpařeno 2,3 kg vody za potřeby 2,51 kWh elektrické energie, z toho je patrné že na 1kg odpařené vody bylo potřeba 1,09kWh. Sušárna sušila štěpku s 13,2% zaplněním objemu bubnu sušárny.

Z naměřených hodnot byla vypočtena teplo-směnná plocha 1,634 m², objem 0,053 m³, doba sušení z 50% na 20% vlhkost 1,53 h. Za tuto dobu bylo odpařeno 1,035 kg vody. Dále byla vypočtena odpařivost plošná 0,414 kg/h.m², odpařivost objemová 12,755 kg/h.m³ a množství tepla dodané na 1 kg odpařené vody skutečné 3924 kJ a teoretické 2674 kJ. Odčítáním těchto hodnot se určila ztráta tepla 1250 kJ.

Měření může obsahovat nepřesnosti kvůli nehomogenosti sušeného materiálu. Čím menší jsou sušené částice, tím dříve se vysuší a naopak. Také je zde únik tepla a mírné ochlazení vážením a odebíráním štěpky. Následkem je zvýšení spotřeby elektrické energie. Nepřesnost spínáním termostatu v různou dobu ale také nepřesnost vážení.



Obr.21: Počáteční stav štěpky (vlevo) a štěpky po třech hodinách sušení (vpravo)

7.2 Experiment č.2 Sušení bez míchání

Experiment se zabývá sušením štěpky s vysokým obsahem vody v kampaňovité sušárně **bez rotujících lopatek**. Účelem je porovnání doby sušení a množství odpařené vody s použitím míchadla a bez něho.

Experiment probíhal na stejné kampaňovité sušárně, jako bylo u experimentu č. 1. Změna experimentu spočívala v sušení bez rotujících lopatek odstraněný z vnitřku sušárny. Lopatky sloužili k promíchávání sušené štěpky.

Pro sušení byla použita štěpka s podobnou vlhkostí a objemem. Sušení probíhalo dvě hodiny. V době sušení nebyla štěpka nijak promíchána, nebo vytažena z bubnu sušky. Počáteční vlhkost a vlhkost po dvou hodinách byly změřeny na speciální sušárně a dosazeny do tabulek naměřených hodnot. Pro porovnání experimentů byla sestavena tabulka měrné odpařivosti a křivky sušení.

7.2.1 Zjištěné hodnoty experimentu:

Získané experimentální data byly vloženy do dvou tabulek:

Počáteční stav štěpky

Tabulka 9: Výsledky měření počátečního stavu sušené štěpky

Speciální sušárna vzorky				
Číslo misky	16	10	12	15
Hmotnost misky [g]	40,375	45,611	39,259	42,238
Hmotnost misky + štěpky před sušením [g]	65,144	72,881	66,249	73,142
Hmotnost misky + sušina [g]	49,121	57,265	50,104	56,045
Hmotnost štěpky před sušením [g]	24,769	27,270	26,990	30,904
Hmotnost sušiny [g]	8,746	11,654	10,845	13,807
Vlhkost [%]	64,690	57,264	59,818	55,323
Kampaňovitá sušárna				
Hmotnost štěpky [kg]	3,35			
Elektrina na ohřev sušárny [kWh]	1,73			

Po 2. hodině sušení

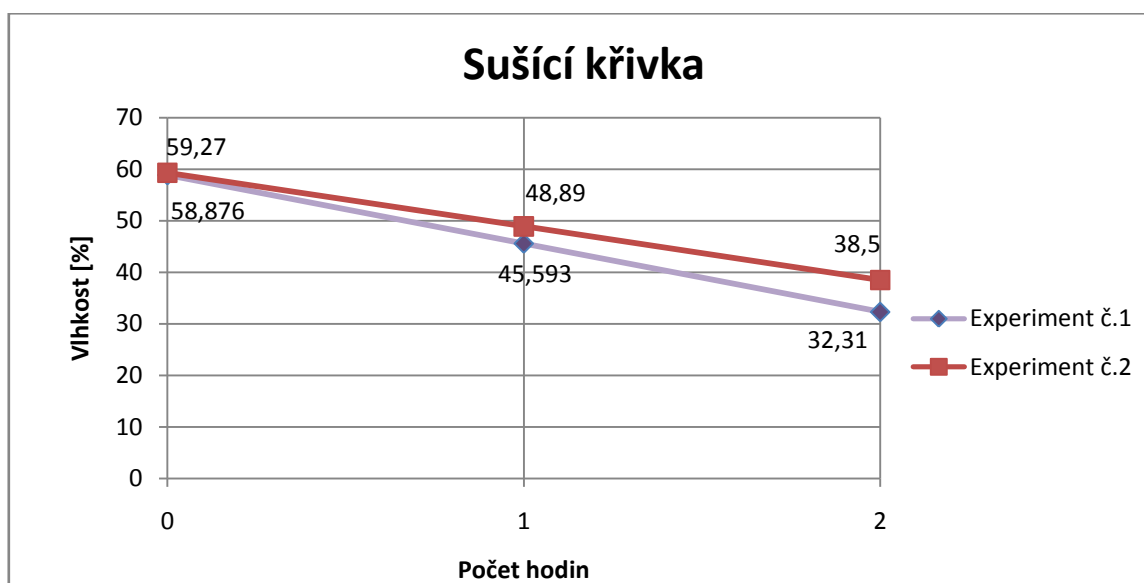
Tabulka 10: Výsledky měření sušení štěpky po dvou hodinách

Speciální sušárna vzorky				
Číslo misky	10	12	15	16
Hmotnost misky [g]	45,611	39,259	42,238	40,375
Hmotnost misky + štěpky před sušením [g]	62,420	53,882	61,252	57,985
Hmotnost misky + sušina [g]	55,677	47,731	54,600	51,499
Hmotnost štěpky před sušením [g]	16,809	14,623	19,014	17,610
Hmotnost sušiny [g]	10,066	8,472	12,362	11,124
Vlhkost [%]	40,115	42,064	34,985	36,831
Kampaňovitá sušárna				
Hmotnost štěpky [kg]	2,25			
Hmotnost odpařené vody [kg]	1,1			
Elektrina na ohřev sušárny [kWh]	1,19			

7.2.2 Porovnání experimentů

Z naměřených hodnot byla sestavena křivka sušení obr. 22 a tabulka odpařivosti tab. 11.

Aby bylo možné experiment porovnat byly brány v potaz jen druhá měření obou experimentů, protože experiment č.1 byl měřen každou hodinu a č.2 jen po dvou. Hodnoty odebrané vody a vlhkosti byly zprůměrovány k průměrné hodině.



Obr.22: Graf porovnání sušících křivek experimentu č.1 s č.2

Tabulka 11: Porovnání parametrů experimentu č.1 a č.2

	Odpařená voda [kg/h]	Měrná odpařivost plošná [kg/h.m ²]	Měrná odpařivost objemová [kg/h.m ³]	Spotřeba el. Energie [kWh]
Experiment č.1	0,875	0,535	16,509	0,945
Experiment č.2	0,550	0,337	10,377	0,595

7.2.3 Vyhodnocení experimentu

Cílem experimentu bylo zjistit vliv lopatkového míchadla na proces sušení uvnitř kampaňovité sušárny. Průměrná počáteční vlhkost štěpky byla 59,27 %. Po dvou hodinách sušení 38,5 %. Při procesu sušení bylo za 2 hodiny bylo odpařeno 1,1 kg vody a spotřebováno 1,19 kWh elektrické energie. Naměřené hodnoty můžou obsahovat chyby vlivem nepřesného měření.

V porovnání s experimentem č.1 kde bylo použito k sušení lopatkové míchadlo je toto sušení méně účinné. U experimentu č.1 bylo odpařeno za 2 hodiny sušení 1,75 kg vody za potřeby 1,89 kWh el. energie, u experimentu č.2 odpařeno 1,1 kg vody za potřeby 1,19 kWh el. energie viz. tabulka 11. Z toho je patrné, že lopatkové míchadlo zkracuje dobu sušení o 32%. Nevýhodou u experimentu č.1 je další potřeba el. energie pro pohon lopatkového míchadla. U experimentu č. 2 je nevýhodou nalepování suché štěpky na zdi uvnitř sušárny co ztěžuje vyprazdňování.

8. Návrhová část

Tato kapitola se zaměřuje na návrh sušárny biomasy s vysokým obsahem vody. Pro návrh byla zvolena **bubnová sušárna s kontaktním otopem**.

Zadané parametre důležité pro návrh sušky:

- a) Otop parou 3,5 baru (teplota u experimentu přibližně odpovídá)
- b) Sušený materiál - dřevní štěpka
- c) Parametre sušeného materiálu viz. tabulka 12:

Tabulka 12: Zadané parametre pro návrh sušky

Parametr	označení	velikost
Vlhkost sušeného paliva [%]	W _{sp}	50
Vlhkost vysušeného paliva [%]	W _{vp}	20
Množství sušeného paliva [kg/h]	M _{sp}	100

Pro návrh bylo důležité určit nejdříve hmotnostní a tepelnou bilanci. Z hmotnostní bilance a měrné odpařivosti byly určeny rozměry sušárny a z tepelné bilance energetická náročnost. Důležitou částí byl technologický návrh. Tato část obsahuje návrh mísení štěpky, otopu, pohonu, plnění bubnu a nakonec schéma sušárny.

8.1 Hmotnostní bilance

Výpočet slouží k určení množství vody, kterou je nutno odpařit při procesu sušení. Také slouží k určení obsahu vody v palivu před a po sušení. Sekce **množství paliva a sušiny** obsahuje sušinu a vodu. Sekce **množství vody** jen obsah vody v palivu a odpařenou vodu. Výstupy jsou použity pro tepelnou bilanci.

Množství paliva a sušiny

Sušené palivo : $M_{sp} = 100 \text{ kg/h}$

vysušené palivo : $M_{vp} = M_{sp} \cdot \frac{1-W_{sp}}{1-W_{vp}} = 100 \cdot \frac{1-0,5}{1-0,2} = 62,5 \text{ kg/h}$ (21)

Množství sušiny : $M_{suš} = M_{sp} \cdot (1 - W_{sp}) = 100 \cdot (1 - 0,5) = 50 \text{ kg/h}$ (22)

Množství vody

$$\text{Sušené palivo :} \quad M_{w,sp} = M_{sp} \cdot W_{sp} = 100 \cdot 0,5 = 50 \text{ kg/h} \quad (23)$$

$$\text{Vysušené palivo :} \quad M_{w,vp} = M_{vp} \cdot W_{vp} = 62,5 \cdot 0,2 = 12,5 \text{ kg/h} \quad (24)$$

$$\text{Odebraná voda :} \quad M_w = M_{w,sp} - M_{w,vp} = 50 - 12,5 = 37,5 \text{ kg/h} \quad (25)$$

Vzorce pro výpočet množství vody, paliva a sušiny byly převzaty a upraveny z [8]

8.2 Tepelná bilance

Výpočet slouží k určení velikosti potřebného tepla pro odpaření vody v palivu. Pro výpočet je potřebná hmotnostní bilance, znalost teplot a měrných tepelných kapacit. Výsledkem tepelné bilance je celkové dodané teplo teoretické. Z tepla je určen tepelný příkon.

Teploty

$$\text{Teplota sušeného paliva (počáteční):} \quad t_{sp} = 20 \text{ }^{\circ}\text{C}$$

$$\text{Teplota vysušeného paliva (výstupní):} \quad t_{vp} = 100 \text{ }^{\circ}\text{C}$$

$$\text{Teplota varu vody:} \quad t_w = 100 \text{ }^{\circ}\text{C}$$

$$\text{Měrné výparné teplo vody [26]:} \quad r_{FG} = 2\,257 \text{ kJ/kg}$$

Měrná tepelná kapacita

$$\text{vody:} \quad c_v = 4,183 \text{ kJ/kg.K}$$

$$\text{sušiny [25]:} \quad c_s = 1,571 + 0,00277 \cdot T = 2,383 \text{ kJ/kg.K} \quad (26)$$

Množství tepla k ohřevu

$$\text{Sušiny:} \quad Q_{os} = c_s \cdot M_{suš} \cdot \Delta t = 2,383 \cdot 50 \cdot (100 - 20) = 9\,532 \text{ kJ/h} \quad (27)$$

$$\text{Vody:} \quad Q_{ov} = c_v \cdot M_{w,sp} \cdot \Delta t = 4,183 \cdot 50 \cdot (100 - 20) = 16\,372 \text{ kJ/h} \quad (28)$$

$$\text{Odpaření vody:} \quad Q_{oD} = r_{FG} \cdot M_w = 2\,257 \cdot 37,5 = 84\,638 \text{ kJ/h} \quad (29)$$

$$\text{Celkové: } Q_c = Q_{os} + Q_{ov} + Q_{oD} = 9\,532 + 16\,372 + 84\,638 = 110\,542 \text{ kJ/h} \quad (30)$$

$$\text{Teplo dodané pro odpaření 1kg vody:} \quad Q_{teor} = \frac{Q_c}{M_w} = \frac{110\,541,5}{37,5} = 2\,948 \text{ kJ} \quad (31)$$

Tepelný příkon k sušení:
$$P_{teor} = \frac{Q_c}{\tau_n} = \frac{110\,541,5}{3600} = 30,706 \text{ kW} \quad (32)$$

Vzorce pro výpočet tepla byly převzaty z [8].

8.3 Návrh rozměrů bubnu

Kapitola pozůstává z konečného návrhu rozměrů bubnu. Návrh bubnu určí představu velikosti bubnové sušárny. Rozměry lze získat za pomoci výpočtu, výstupu hmotnostní bilance a získaných údajů z experimentu.

Pro výpočet rozměrů bubnu byly použity vypočtené hodnoty z experimentu č.1 při 13,2% zaplnění bubnu mokrou štěpkou. Důležitý získaný parametr je měrná odpařivost plošná a potřebné množství odpařené vody 37,5 kg/h. Z těchto hodnot byla vypočtena teplo-směnná plocha bubnu sušárny. Ze získané teplo-směnné plochy byly dále dopočteny rozměry délky a vnitřního průměru bubnu.

Teplo-směnná plocha:
$$S_{pl} = \frac{M_w}{O_p} = \frac{37,5}{0,414} = 90,6 \text{ m}^2 \quad (33)$$

Vnitřní průměr bubnu:
$$d = \sqrt{\frac{S_{pl}}{8\pi}} = \sqrt{\frac{90,6}{8\pi}} = 1,9 \text{ m} \quad (34)$$

Délka bubnu [8]:
$$l = 4 \cdot d = 4 \cdot 1,9 = 7,6 \text{ m} \quad (35)$$

8.4 Energetická náročnost

Pro zjištění skutečného tepelného příkonu navrhované sušky je zapotřebí znát opravný součinitel zjištěný z experimentu. Následně se tímto součinitelem vynásobí teoretické množství tepla.

Teplo skut. (1kg vody):
$$Q_{skut} = Q_{teor} \cdot Q_{opr} = 2\,948,1467 = 4\,324,72 \text{ kJ} \quad (36)$$

Teplo celkové:
$$Q_c = Q_{skut} \cdot M_w = 4\,324,72 \cdot 37,5 = 162\,177 \text{ kJ/h} \quad (37)$$

Tepelný příkon [6]:
$$P_{skut} = \frac{Q_c}{\tau_n} = \frac{162\,177}{3600} = 45,05 \text{ kW} \quad (38)$$

8.5 Technologický návrh

Obsahuje technologickou část sušárny. Je jím otop sušárny, provozní bilance páry, způsob mísení štěrky, pohon a plnění bubnu. Patří sem také základní schéma navrhované sušárny.

Otop sušárny

Pro kontaktní bubnovou sušárnu bylo zadáno topné médium pára. Pára slouží k vyhřívání trubek uvnitř sušárny. Trubky tvoří teplo-směnnou plochu, která předává teplo sušenému materiálu. Dodávání páry do trubek umístěných v rotujícím bubnu řeší rotační rozvaděč. Rozvaděč řeší také odvod kondenzátu. [10]

Provozní bilance páry

Důležitá je volba kondenzace páry. Byla zvolena kondenzace páry uvnitř trubek sušky pro lepší využití tepelné energie. Vodní pára bude přiváděna nízkou rychlostí a kondenzovat na stěnách trubky. Proudění kondenzátu bude vlnkové nebo stratifikované. Proudění za nízkých rychlostí umožní rovnoměrnější rozložení teplot uvnitř bubnu. [27]

Pro otop byla dána vodní pára o tlaku 3,5 bar co odpovídá zhruba teplotě experimentu 140 °C. Entalpie páry je pro tento zadaný tlak 2732,1 kJ/kg. Kondenzát má entalpii 584,2 kJ/kg. Požadované dodané teplo je 162 177 kJ/h. [26]

$$\text{Množství potřebné páry [28]: } \dot{m} = \frac{Q_c}{H_v - H_l} = \frac{162\,177}{2732,1 - 584,2} = 75,5 \text{ kg/h} \quad (39)$$

Způsob mísení štěrky

Z provedených experimentů je patrné, že mísení sušené štěrky má významný vliv na zkrácení doby sušení. Proto je vhodné navrhnout rotující část kterou může být:

- a) **varianta č.1** pozůstává z pevně umístěného bubnu s rotujícími lopatky uvnitř bubnu
- b) **varianta č.2** pozůstává z rotujícího bubnu s vestavbou

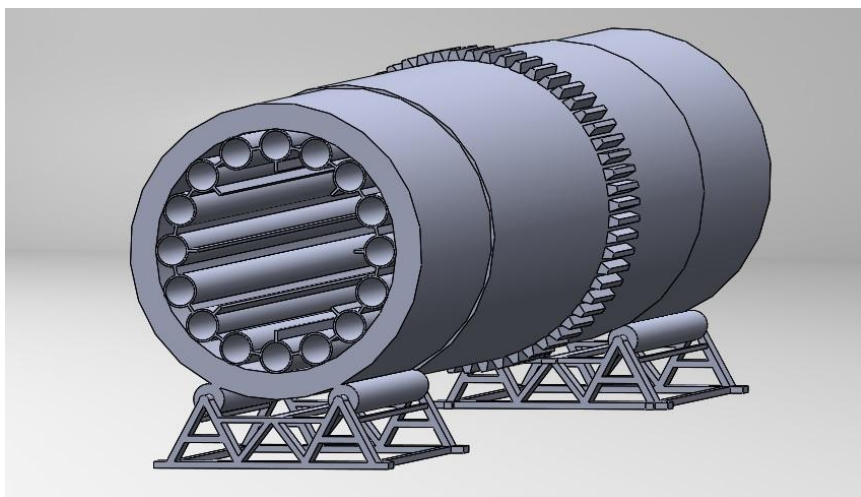
Pro návrh byla zvolena varianta č.2. Svojí vestavbou zvětšuje povrch styku sušeného materiálu a teplo-směnné plochy. Je také vhodnější pro zvolený typ otopu, usnadní plnění a vyprazdňování bubnu sušeným a vysušeným materiálem. [10]

Pohon a plnění bubnu

Pohon bubnu je řešený ozubeným převodem a elektromotorem s převodovkou. Buben je uložen na rotujících válcích. Plnění a vyprázdnění vnitřku bubnu sušeným a vysušeným materiálem je řešeno podavači. [22]

8.6 Schéma sušárny

Schéma byla vytvořena v CAD programu Solid Works. Pozůstává z návrhu rozměrů a technologického návrhu. Na navržené sušce jsou vidět lopatky podporující lepší promíchávání sušeného materiálu viz. obr. 24. Z obrázku lze pozorovat zvýšenou hranu na plášti zabraňující osovému posunutí a zuby ozubeného převodu na povrchu pláště. Uvnitř pláště se nachází tepelná izolace.



Obr.23: Schéma navrhované sušárny

9. Závěr

Cílem této práce bylo navrhnout sušku pro využití odpadní biomasy s vysokým obsahem vody pro zadané parametry provozu. Aby mohla být suška navržena bylo zapotřebí seznámení s vlhkostí a jejíma vlastnostmi a procesem sušení. V kapitole sušení byly popsány metody, parametre sušení, statika a kinetika sušení. V statice a kinetice sušení byla popsána hmotnostní, tepelná bilance a křivka sušení. Jsou to důležité parametre pro sušení. Práce obsahuje popsání přehled sušek a jejich porovnání pro snazší výběr vhodného typu sušky. Pro návrh byla zvolena **bubnová rotační suška s kontaktním ohřevem** pro její energetickou úsporu a vhodnost pro sušení štěpky.

Kromě zadaných parametrů návrhu bylo potřeba zjistit experimentálně určené provozní charakteristiky kontaktní sušky. Experimenty probíhali v prostorách laboratoři ČVUT Juliska na kampaňovité sušárně. Cílem experimentů bylo porovnání sušení biomasy s mícháním a bez míchání, průběh vlhkosti během sušení a energetickou náročnost. Ze získaných údajů byla vypočtena **teplo-směnná plocha** a získána **sušící křivka**. Z křivky byla vypočtena doba sušení a množství odebrané vody z 50% na 20% vlhkost. Tyto údaje posloužili k výpočtu **měrné odpařivosti plošné $0,414 \text{ kg/h.m}^2$** . Z dodané tepelné energie se vypočetla ztráta tepla pro přesnější určení tepla pro navrhovanou sušku. Výsledky experimentů zjistili, že použití míchadla zkracuje dobu sušení o 32 %.

Návrh sušky vychází ze zadaných parametrů, měrné odpařivosti a zjištěné ztráty tepelné energie. Jako první byla vypočtená **hmotnostní bilance**. Bilance obsahuje množství vody a sušiny v materiálu. Dále byla vypočtená **tepelná bilance** obsahující teoretické teplo pro odpaření vody ze sušené štěpky. Teplo je potřebné upravit o ztrátu zjištěnou z experimentu pro celkovou **energetickou náročnost**. Tepelný příkon byl vypočten **45,05 kW**. Z Měrné odpařivosti plošné byly vypočteny rozměry bubnu. Délka bubnu je **7,6 m** a vnitřní průměr **1,9 m**. Návrh sušky obsahuje také technologický návrh. V návrhu je navržen otop bubnu, provozní bilance páry, způsob mísení štěpky, pohon a plnění bubnu. Potřebné množství páry k sušení štěpky bylo určeno přibližně 75,5 kg vodní páry za hodinu. Zakončením návrhu je schéma navržené sušky vytvořené v CAD programu.

10. Seznam použité literatury

- [1] HAVLÍK, Jan. *Obnovitelné zdroje energie*. [PDF]. [vid. 27.5.2018]. Dostupné z [www: http://energetika.cvut.cz/files/OZE%20p1.pdf](http://energetika.cvut.cz/files/OZE%20p1.pdf)
- [2] KÁRA, Jaroslav, Zdeněk PASTOREK a Petr JEVIČ. *Biomasa: obnovitelný zdroj energie*. Praha: FCC Public, 2004. ISBN 80-86534-06-5.
- [3] MURTINGER, Karel a Jiří BERANOVSKÝ. *Energie z biomasy*. Brno: Computer Press, 2011. ISBN 978-80-251-2916-6.
- [4] GRDZELIŠVILI, Gulnara a HOFFMAN, Pavel. Sušení rostlinných materiálů. [PDF]. [vid. 27.5.2018]. Dostupné z [www: http://chps.fsic.cvut.cz/pt2010/pdf/GrdzelisviliGulnara.pdf](http://chps.fsic.cvut.cz/pt2010/pdf/GrdzelisviliGulnara.pdf)
- [5] TZBINFO. *Vliv vlhkosti dřeva na výhřevnost a měrnou hmotnost*. [TABULKA]. [vid. 27.5.2018]. Dostupné z [www: https://www.tzb-info.cz/tabulky-a-vypocty/12-vyhrevnosti-a-merne-jednotky-palivoveho-dreva](https://www.tzb-info.cz/tabulky-a-vypocty/12-vyhrevnosti-a-merne-jednotky-palivoveho-dreva)
- [6] GRUBER, J. *Sušení biomasy*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2014. 62 s. Vedoucí diplomové práce doc. Ing. Jiří Pospíšil, Ph.D.
- [7] HRABÁNEK, R. *Metody sušení biomasy*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2010. 30 s. Vedoucí bakalářské práce doc. Ing. Michal Jaroš, Dr.
- [8] KROUPA, z. *Sušení biomasy*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2017. 37 s. Vedoucí diplomové práce Ing. Marek Baláš, Ph.D.
- [9] Tuček, J. *Návrh kogenerační jednotky s výkonem 200 KWE s dodávkou tepla pro sušárnu*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2014. 66 s. Vedoucí diplomové práce Ing. Martin Lisý, Ph.D.
- [10] ŠESTÁK, Jiří a Rudolf ŽITNÝ. *Tepelné pochody II: výměníky tepla, odpařování, sušení, průmyslové pece a elektrický ohřev*. Vyd. 2. Praha: Nakladatelství ČVUT, 2006. ISBN 80-01-03475-5.
- [11] BALÁŠ, Marek. *Graf závislosti výhřevnosti biomasy na vlhkosti*. [OBRÁZEK]. [vid. 27.5.2018]. Dostupné z [www: https://biom.cz/cz/obrazek/graf-zavislosti-vyhrevnosti-biomasy-na-vlhkosti](https://biom.cz/cz/obrazek/graf-zavislosti-vyhrevnosti-biomasy-na-vlhkosti)

- [12] ŽITNÝ, Rudolf. *Tepelná zařízení*. [EL. PREZENTACE]. [vid. 27.5.2018]. Dostupné z [www: http://slideplayer.cz/slide/3836653/](http://slideplayer.cz/slide/3836653/)
- [13] UTĚŠIL, Tomislav. *Suška na biomasu*. [ONLINE]. [vid. 27.5.2018]. Dostupné z [www: https://biom.cz/cz/odborne-clanky/suska-na-biomasu](https://biom.cz/cz/odborne-clanky/suska-na-biomasu)
- [14] PAWLICA. *Pásové sušárny STELA BTL*. [OBRÁZEK]. [vid. 27.5.2018]. Dostupné z [www: http://www.pawlica.cz/produkty/prumyslove-susicky/pasove-susarny-stela/susicky-na-digestat,-vypalky-a-kaly/susarny-stela-btl.html](http://www.pawlica.cz/produkty/prumyslove-susicky/pasove-susarny-stela/susicky-na-digestat,-vypalky-a-kaly/susarny-stela-btl.html)
- [15] CRONIMO. *Rourová sušička na piliny*. [OBRÁZEK]. [vid. 27.5.2018]. Dostupné z [www: http://www.cronimo.cz/rourova-susicka](http://www.cronimo.cz/rourova-susicka)
- [16] BIOM.CZ. *Využití univerzální šnekové sesypné sušárny BSC - 1*. [ONLINE]. [vid. 27.5.2018]. Dostupné z [www: https://biom.cz/cz/odborne-clanky/vyuziti-univerzalni-snekove-sesypne-susarny-bcs-1](https://biom.cz/cz/odborne-clanky/vyuziti-univerzalni-snekove-sesypne-susarny-bcs-1)
- [17] HOFFMAN, Pavel. *Měření na rozprašovací sušárně Anhydro - návod*. [PDF]. [vid. 27.5.2018]. Dostupné z [www: http://www1.fs.cvut.cz/cz/U218/pedagog/predmety/5rocnik/exp/spdryer/pdf/susarna.pdf](http://www1.fs.cvut.cz/cz/U218/pedagog/predmety/5rocnik/exp/spdryer/pdf/susarna.pdf)
- [18] ROMILL. *Mikrovlnné sušení*. [ONLINE]. [vid. 27.5.2018]. Dostupné z [www: http://www.romill.cz/cz/mikrovlne-suseni](http://www.romill.cz/cz/mikrovlne-suseni)
- [19] NEUVEDEN, Autor. *Dielektrická elektrotepelná zařízení*. [OBRÁZEK]. [vid. 27.5.2018]. Dostupné z [www: https://www.powerwiki.cz/attach/A1B15EN3/dielzar.ppt](https://www.powerwiki.cz/attach/A1B15EN3/dielzar.ppt)
- [20] ASTRANET.CZ. *Infračervená sušička Yden CI IR D5*. [OBRÁZEK]. [vid. 27.5.2018]. Dostupné z [www: https://www.atranet.cz/infracervena-susicka-yden-ci-ir-d5-4vlozky](https://www.atranet.cz/infracervena-susicka-yden-ci-ir-d5-4vlozky)
- [21] NEUVEDEN, Autor. *Osmoanabiosa*. [OBRÁZEK]. [vid. 27.5.2018]. Dostupné z [www: http://docplayer.cz/45407327-Osmoanabiosa-princip-osmoanabiosy-aktivita-vody-aktivita-vody-aktivita-vody-vodni-aktivita-aktivita-vody.html](http://docplayer.cz/45407327-Osmoanabiosa-princip-osmoanabiosy-aktivita-vody-aktivita-vody-aktivita-vody-vodni-aktivita-aktivita-vody.html)
- [22] KOVAŘÍK, Pavel. *Drying of biomass with high water content*. Praha: České vysoké učení technické v Praze. Fakulta strojní. 2017. 79 s. Vedoucí diplomové práce Ing. Jan Havlík.

- [23] HAVLÍK, Jan a Tomáš DLOUHÝ. *Provozní charakteristiky kontaktní parní sušky na biomasu*. [PDF]. [vid. 27.5.2018]. Dostupné z www: www.eu.fme.vutbr.cz/file/426_1_1
- [24] TZBINFO. *Převodník jednotek*. [KALKULAČKA]. [vid. 27.5.2018]. Dostupné z www: <https://www.tzb-info.cz/tabulky-a-vypocty/49-prevodnik-jednotek>
- [25] NEUVEDEN, Autor. *Neuveden*. [ONLINE]. [vid. 27.5.2018]. Dostupné z www: https://is.mendelu.cz/eknihovna/opory/zobraz_cast.pl?cast=9182
- [26] TZBINFO. *Vlastnosti syté vodní páry při daném tlaku*. [TABULKA] [vid. 27.5.2018]. Dostupné z www: <https://www.tzb-info.cz/tabulky-a-vypocty/9-vlastnosti-syte-vodni-pary-pri-danem-tlaku>
- [27] VANĚK, Martin. *Kondenzace vodní páry v trubce*. Praha: České vysoké učení technické v Praze. Fakulta strojní. 2016. 39 s. Vedoucí bakalářské práce Ing. Zdeněk Sumara.
- [28] DLOUHÝ, Tomáš. *Konstrukční návrh výměníku tepla*. [PDF]. [vid. 27.5.2018]. Dostupné z www: [http://energetika.cvut.cz/files/VTK%20pr2\[1\].pdf](http://energetika.cvut.cz/files/VTK%20pr2[1].pdf)